

DISEÑO OPTIMIZADO DE UN HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE REFORZADO CON FIBRA DE POLIPROPILENO CON FUNCIÓN ESTRUCTURAL, PARA EL EMPLEO EN OBRAS DE REHABILITACIÓN

Pedro CARBALLOSA DE MIGUEL

Ingeniero de Materiales
Instituto de Ciencias de la Construcción
Eduardo Torroja (IETcc-CSIC)
carballosa@ietcc.csic.es

José Pedro GUTIÉRREZ JIMÉNEZ

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Instituto de Ciencias de la Construcción
Eduardo Torroja (IETcc-CSIC)
jpgutierrez@ietcc.csic.es

Antonia PACIOS ÁLVAREZ

Dr. Arquitecto
Universidad Politécnica de Madrid. Escuela
Técnica Superior de Ingenieros Industriales
antonia.pacios@upm.es

Peter TANNER

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Instituto de Ciencias de la Construcción
Eduardo Torroja (IETcc-CSIC)
tannerp@ietcc.csic.es

RESUMEN

El empleo de hormigones de altas prestaciones es necesario para dar una mejor respuesta a los requisitos técnicos de obras de rehabilitación. Este tipo de hormigones, además de unas elevadas prestaciones mecánicas, permiten obtener una alta trabajabilidad para rellenar elementos de espesores reducidos, una durabilidad adecuada, para resistir la agresividad del medio, y una buena calidad de acabados.

Este trabajo persigue optimizar el diseño de mezclas de hormigones autocompactantes fibrorreforzados con fibra sintética de manera que, sin perder la condición de autocompactabilidad, cumplan las especificaciones recogidas en el Anejo 14 de la EHE-08 para la consideración de la fibra con función estructural, lo que permitiría la sustitución total o parcial de armaduras de acero. Por tanto, la ejecución de obras de rehabilitación con esta tipología de hormigones permite por un lado una puesta en obra rápida y de calidad, y por otro evitar aparición de procesos patológicos derivados de la corrosión de las armaduras.

PALABRAS CLAVE: Hormigón autocompactante, refuerzo, fibras sintéticas poliméricas, rehabilitación

1. Introducción

El hormigón autocompactante es un hormigón que, como consecuencia de una dosificación estudiada y del empleo de aditivos superplastificantes específicos, se compacta por la acción de su propio peso, sin necesidad de energía de vibración ni de cualquier otro método de compactación, no presentando segregación, bloqueo de árido grueso, ni exudación de la lechada.

Los hormigones reforzados con fibras se definen como aquellos hormigones que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa. Estas fibras, fabricadas en un amplio rango de materiales (acero, vidrio, polímeros, carbono...), formas y características, son utilizadas ampliamente para prevenir y controlar la fisuración del hormigón, dotan al mismo de un mejor comportamiento (resistente y tenaz) frente a sollicitaciones distintas a la de compresión, consiguiendo aportar ductilidad una vez se ha producido el fallo de la matriz

cementicia, puenteando las fisuras, transmitiendo la tensión a través de las fibras evitando el crecimiento de estas fisuras.

Las fibras pueden ser consideradas con función estructural cuando cumplan los requisitos recogidos en el Anejo 14 de la EHE-08 [1], contribuyendo en los cálculos relativos a alguno de los estados límites últimos o de servicio, y permitiendo su empleo la sustitución parcial o total de armadura en determinadas aplicaciones.

La fibra comúnmente más utilizada, con función estructural, es la fibra de acero. Sin embargo, en este estudio se utilizan fibras sintéticas estructuralmente eficientes que incrementan la tenacidad y/o capacidad de carga post-fisuración, añadiendo este uso al tradicional para este tipo de fibras basado en el control de fisuración, mejora del comportamiento frente a la retracción y mejora del comportamiento frente al fuego.

En este estudio, la elección de fibras de naturaleza sintética frente a las de acero se fundamenta no sólo en su buen comportamiento post-fisuración, en lo que a capacidad portante y absorción de energía se refiere, sino también en la mayor resistencia a la corrosión que presentan este tipo de fibras sintéticas frente a las de acero.

Por otro lado, uno de los aspectos a considerar en el diseño de hormigones fibrorreforzados es la influencia que tiene la adición de fibras sobre las propiedades del hormigón en estado fresco, concretamente sobre la trabajabilidad, la cual, según el caso, puede verse significativamente afectada de forma negativa en función del tipo y de la proporción de las fibras adicionadas.

Por tanto, teniendo en cuenta lo expuesto y que el árido utilizado es de origen volcánico, el objetivo del presente estudio se basa en determinar, basándonos en criterios de puesta en obra, resistencia y durabilidad, la dosificación óptima de un hormigón autocompactante fibrorreforzado con fibra sintética de forma que se pueda estudiar y evaluar la resistencia a la fisuración y el comportamiento post-fisuración aportado por la fibra sintética y el cumplimiento, o no, de la condición de fibra con función estructural, en los términos que recoge el Anejo 14 de la EHE-08.

2. Campaña experimental

Se definen teóricamente nueve mezclas de hormigón sobre las que se evalúa el comportamiento en estado fresco, ajustando en caso necesario la proporción de componentes que asegure la autocompactabilidad, y el comportamiento en estado endurecido, determinando la tenacidad y resistencia a la tracción por flexión sobre dos probetas de dimensiones 600 x 150 x 150 mm en los términos que recoge la norma UNE EN 14651 [2].

El objeto de esta fase es seleccionar 3 dosificaciones verosímiles de hormigón autocompactante fibrorreforzado, que cumplan con los parámetros reológicos de autocompactabilidad, y evaluar, en profundidad, el comportamiento mecánico, prestando especial atención al cumplimiento de los requisitos recogidos en el Anejo 14 de la EHE-08 [1] en la consideración de la fibra con función estructural, y de durabilidad.

2.1 Materiales

Los materiales utilizados y sus características se exponen en las tablas que figuran a continuación:

Clase	Densidad	Resistencia a compresión		Tiempo de fraguado		Expansión
		2 días	28 días	Inicial	Final	
CEM II/A-P 42,5 R	3,1 g/cm ³	> 20 MPa	> 42,5 MPa	> 60 minutos	< 12 horas	< 10mm

Tabla 1. Especificaciones técnicas del cemento.

Propiedades	Fracciones de árido			Filler
	4/10*	0/4*	0/3	
Peso específico (gr/cm ³)	2,52	2,67	2,72	2,72
Absorción (%)	4,5	2,9	3,5	0,25
Humedad (%)	0	0	0	0
Contenido de finos (%)	0,40	5,20	-	100
Coefficiente los Ángeles	21	-	-	-

Tabla 2. Especificaciones técnicas de los áridos y el filler.

*Árido volcánico

Tipo de fibra	Material	Longitud de la fibra (mm)	Densidad (gr/cm ³)	Resistencia a Tracción (MPa)	Elongación (%)
Fibra tipo 1	Polipropileno	50	0,88 - 0,92	275	24,4
Fibra tipo 2	Polipropileno	44	0,91	400	7

Tabla 3. Especificaciones técnicas de la fibra.

Tipo de aditivo	Densidad (gr/cm ³)	Residuo seco (%)	Contenido de cloruros	Rango de dosificación (%)	PH 20°C
Superplastificantes	1,045 ±0,02	22 ±1	Exento	0,2 – 3	6,5 ±1
Polifuncional	1,045 ±0,02	39-43	≤ 0,1%	0,4-1	7,5-9,5

Tabla 4. Especificaciones técnicas de los aditivos.

2.2 Diseño inicial de mezclas

El diseño de las mezclas de hormigón objeto de estudio se realiza partiendo de una tipificación teórica HA-35/AC/10/Ila, siguiendo, en un principio, las recomendaciones recogidas en el Anejo 17 de la EHE-08 [1], siendo modificadas varias de estas recomendaciones con el fin de obtener un esqueleto granular compacto y un porcentaje de pasta tal que permita satisfacer las exigencias de autocompactabilidad de los hormigones autocompactantes fibrorreforzados con fibra sintética. Los ensayos para evaluar la autocompactabilidad se recogen en la tabla 5.

Ensayo	Norma
Ensayo del escurrimiento.	UNE EN 12390-8 [3]
Ensayo del embudo en V.	UNE EN 12390-9 [4]
Ensayo del escurrimiento con el anillo japonés.	UNE EN 12390-12 [5]

Tabla 5. Ensayos para evaluación de la autocompactabilidad.

Las mezclas diseñadas en total fueron 9. La tabla 6 muestra la proporción de componentes utilizadas para la elaboración de las dosificaciones mencionadas (se prescinde referenciar las dosificaciones HACRF-5 y HACRF-6 porque las dosificaciones HACRF-7 y HACRF-8, resultan del ajuste de la proporción de aditivo de las mencionadas anteriormente).

Materiales componentes (kg/m³)	HACRF-1	HACRF-2	HACRF-3**	HACRF-4*	HACRF-7*	HACRF-8**	HACRF-9
Agua	185,00	180,000	190,00	190,00	211,00	211,00	211,00
Cemento 42,5 R	380,00	380,000	400,00	400,00	380,00	380,00	380,00
Grava 4/10	513,91	605,243	419,41	419,41	563,75	553,00	553,00
Arena 0/4	1056,98	1003,012	1087,95	1087,95	600,00	590,00	590,00
Arena 0/3	-	-	-	-	288,36	280,00	280,00
Filler	230,00	200,000	250,00	250,00	270,00	300,00	300,00
Aditivo tipo 1	11,913	11,913	12,540	12,540	9,600	9,600	9,600
Aditivo tipo 2	-	-	-	-	1,44	1,44	1,44
Fibra tipo 1	7,000	7,000	7,000	7,000	6,000	6,000	-
Fibra tipo 1	-	-	-	-	-	-	7,000
Volumen de pasta (%)	40	39	43	43	45	46	46
Relación A/C	0,49	0,47	0,48	0,48	0,56	0,56	0,56
Relación A/finos	0,30	0,31	0,29	0,29	0,32	0,31	0,31

Tabla 6. Diseño inicial de mezclas.

* La fibra se añade al final del amasado del hormigón fresco

** La fibra se añade junto con los áridos (aumenta la dispersión)

En un intento de mejorar la distribución de fibras, se estudió la secuencia de amasado, aumentando además el tiempo de este [6], [7], ya que el aumento del tiempo de amasado activa las partículas de policarboxilato, mejorando su orientación y reduciendo la pérdida de trabajabilidad.

2.3 Resultados preliminares

Los resultados obtenidos, relativos al estado fresco y a la resistencia residual a la tracción por flexión de los hormigones diseñados teóricamente, se exponen en las tablas 7 y 8:

Ensayos		HACRF-3	HACRF-4	HACRF-7	HACRF-8	HACRF-9
UNE EN 12350-8 - Ensayo del escurrimiento.	D _f (mm)	650	740	625	655	765
	T ₅₀ (seg)	4,4	3,4	2,8	2,0	2,0
	T _f (seg)	15,1	12,0	8,0	17,3	15,0
UNE EN 12350-9 - Ensayo del embudo en V.	T _v (seg)	13,8	11,9	4,0	10,4	9,0
UNE EN 12350-12 - Ensayo del escurrimiento con el anillo japonés.	D _f (mm)	550	550	500	500	750
	T ₅₀ (seg)	-	-	-	-	2,3
	T _f (seg)	-	-	-	-	14,4
	C _{be} (%)	0,45	0,45	0,49	0,5	0,85

Tabla 7. Propiedades de autocompactabilidad de los hormigones diseñados.

	HACRF-3	HACRF-4	HACRF-7	HACRF-8	HACRF-9
Cemento (kg/m ³)	400	400	380	380	380
Proporción fibra (kg/m ³)	7 (fibra 1)	7 (fibra 1)	6 (fibra 1)	6 (fibra 1)	7 (fibra 2)
Incorporación de la fibra	Inicio	Final	Final	Inicio	Final
$F_{R,L}$ (N/mm ²)	4,29 - 4,32	4,09 - 5,24	4,61 - 4,46	4,87 - 4,98	5,30 - 5,00
$F_{R,1}$ (N/mm ²)	1,53 - 2,07	1,73 - 2,02	1,67 - 1,70	1,53 - 2,02	1,70 - 1,90
$F_{R,3}$ (N/mm ²)	2,56 - 2,97	2,59 - 2,36	1,87 - 2,02	2,02 - 2,59	2,30 - 2,80

Tabla 8. Propiedades mecánicas de los hormigones diseñados.

A partir de los resultados obtenidos en la evaluación de las propiedades de autocompactabilidad y de resistencia característica residual a tracción por flexión cabe destacar lo siguiente:

- Se descartan las dosificaciones HACRF-1 y HACRF-2, ya que la fibra trava con la grava bloqueando la masa impidiendo el escurrimiento uniforme de la torta de hormigón.
- Las dosificaciones HACRF-8 y HACRF-9 dan los mejores resultados desde el punto de vista de autocompactabilidad, mostrando que es un material viscoso que fluye regularmente, incluso la dosificación HACRF-9 muestra un coeficiente de bloqueo dentro del rango admisible.
- La incorporación de fibras al principio del amasado o al final modifica ligeramente las condiciones de autocompactabilidad y flujo, aunque siempre dentro de los rangos recomendados en el Anejo 17 de la EHE-08.
- Las dosificaciones HACRF-8 y HACRF-9, realizadas con los mismos componentes salvo el tipo y proporción de fibra, muestran un comportamiento reológico óptimo, aunque distinto, presentando mayor facilidad de flujo la dosificación HACRF-9. Este comportamiento se relaciona con el tipo de fibra 2, menos deformable que la tipo 1.
- El mayor contenido de cemento de las dosificaciones HACRF-3 y HACRF-4 no aporta una mayor resistencia final a la flexotracción $f_{R,L}$.
- De los ensayos realizados se extrae que el valor crítico, en el caso de la fibra de polipropileno, para la consideración de la fibra con función estructural, es el valor de la resistencia característica residual a la tracción por flexión para una abertura de fisura de 0,5 mm, $f_{R,1}$, cuyo valor, según especifica la EHE-08, no debe de ser inferior al 40% de $f_{R,L}$.
- La dispersión de resultados relativos a $f_{R,L}$, sin ser concluyentes con sólo dos probetas, parece menor cuando la fibra se incorpora con los áridos al inicio del amasado.



Figura 1. Escurrimiento dosificación HACRF-9.



Figura 2. Distribución fibra, dosificación HACRF-9.

Como resultado de las dosificaciones de prueba y en base a los valores obtenidos de autocompactabilidad y resistencia característica residual a la tracción por flexión se seleccionan las dosificaciones HACRF-4, HACRF-8 y HACRF-9 para la realización de ensayos más exhaustivos entre los que se incluyen la determinación de resistencia a compresión y flexión, módulo de elasticidad, resistencia a la tracción por flexión, absorción de agua por capilaridad y retracción de secado.

3. Resultados experimentales finales

3.1 Amasado

El amasado, en esta parte del estudio, se llevó a cabo con una amasadora de 180 litros de capacidad, para realizar todas las probetas a partir de una misma amasada. Las pruebas de autocompactabilidad realizadas sobre las dosificaciones diseñadas HACRF-4, HACRF-8 y HACRF-9 dieron resultados en el mismo rango que los ensayos preliminares.

3.2 Propiedades mecánicas

En este estudio se evaluaron las propiedades mecánicas recogidas en la tabla 9.

Ensayo	Norma
Resistencia a compresión	UNE EN 12390-3 [8]
Resistencia a flexión	UNE EN 12390-5 [9]
	UNE EN 14651 [2]
Resistencia residual a la tracción por flexión	UNE EN 14651 [2]

Tabla 9. Propiedades mecánicas de los hormigones diseñados.

La resistencia a compresión (figura 3) determinada sobre las dosificaciones objeto de estudio supera el valor de la resistencia característica de proyecto especificada (35 N/mm^2) en la tipificación teórica siendo la dosificación HACRF-4, de mayor proporción de cemento (400 kg/m^3) y menor relación agua/cemento (0,47 frente a 0,55 de las dosificaciones HACRF-8 y HACRF-9), la que alcanza mayor valor de resistencia a compresión. En cuanto a la dispersión de resultados, la dosificación HACRF-9, es la que presenta una mayor dispersión de los mismos.

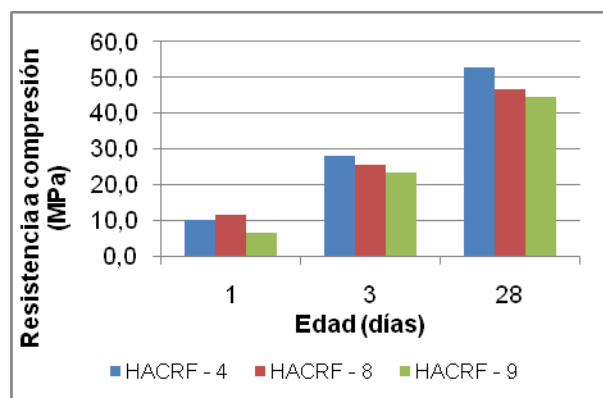


Figura 3. Resistencia a compresión.

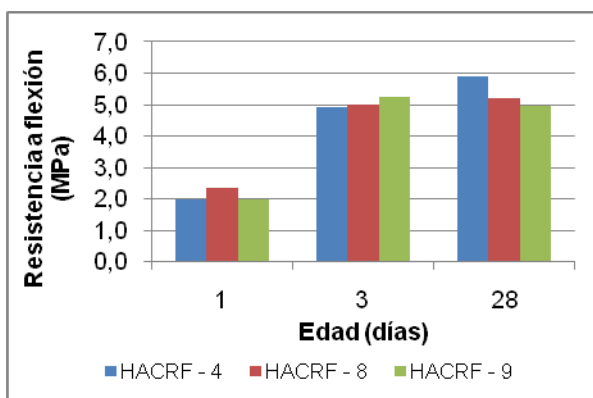


Figura 4. Resistencia a flexión.

La figura 4 muestra los resultados relativos a la resistencia a flexión. A edades tempranas, las tres mezclas diseñadas presentan valores muy similares, presentando a 3 días un valor de resistencia adecuado para su apilamiento. A 28 días la dosificación HACRF-4 es la que alcanza el mayor valor de resistencia a flexión por tracción, debido a la composición de la matriz y a la mayor

proporción de fibra que esta contiene. Sin embargo esta dosificación muestra la mayor dispersión de resultados.

Por otro lado se puede ver, en la superficie de rotura, una distribución de fibras homogénea tanto en las dosificaciones HACRF-4 y HACRF-8 (figura 5), las cuales comparten el mismo tipo de fibra, como en la dosificación HACRF-9 (figura 6).



Figura 5. Distribución fibra, HACRF-4-8.

Figura 6. Distribución fibra, HACRF-9.

La resistencia residual a flexión por tracción puede verse en la figura 7. Todas las probetas ensayadas manifiestan capacidad portante una vez se fisura la matriz de hormigón. La carga de rotura, límite de proporcionalidad (LOP) y comportamiento post-fisuración, en las dosificaciones HACRF-8 y HACRF-9, son muy similares a pesar de contar con distinto tipo y proporción de fibra, mostrando resultados muy similares de resistencia residual a tracción por flexión $f_{R,1}$ y $f_{R,3}$ a las aperturas de fisura (CMOD) 0,5 y 2,5 mm, respectivamente. Sin embargo los resultados obtenidos, y aun mostrando una notable capacidad portante post-fisuración, no son suficientes para la consideración de la fibra con función estructural ya que, $f_{R,1}$, muestra valores inferiores a los especificados en el Anejo 14 de la EHE-08 para tal fin, además la dosificación HACRF-8 presenta una dispersión apreciable de los resultados, hecho que puede deberse a una distribución no uniforme de la fibra en la matriz de hormigón. Por otro lado la dosificación HACRF-4 manifiesta la mayor valor de resistencia a la tracción por flexión, cumpliendo además los requisitos de resistencia residual a tracción por flexión, a las aberturas de fisura 0,5 y 2,5, que le EHE-08 exige, para la consideración de la fibra con función estructural.

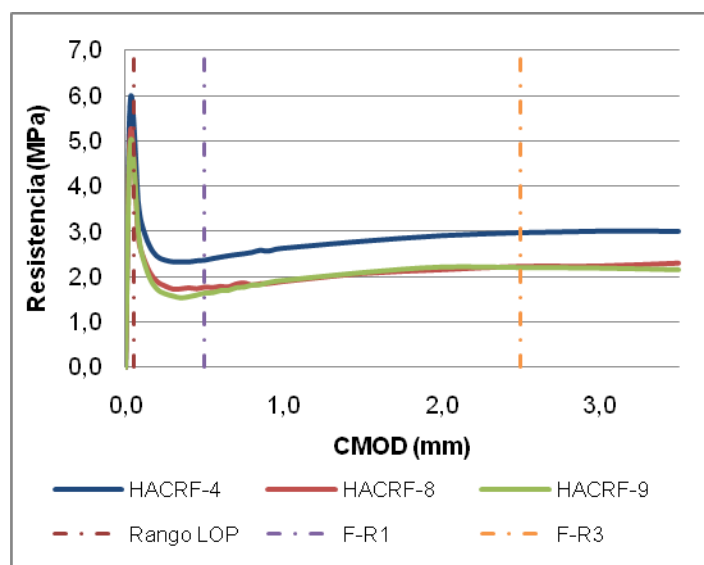


Figura 7. Resistencia residual a la tracción por flexión.

3.3 Durabilidad

La durabilidad se evalúa mediante un control indirecto realizando los ensayos de la tabla 10

Ensayo	Norma
Profundidad de penetración de agua bajo presión.	UNE-EN 12390-8 [10]
Determinación de la absorción de agua por capilaridad	UNE 83982 [11]
Retracción de secado del hormigón	ASTM C490C/157 [12]

Tabla 10. Ensayos para evaluación de la durabilidad.

La penetración de agua bajo presión, en las tres dosificaciones realizadas, no dio ningún resultado cuantitativo (no se observa frente de penetración de agua) lo que pone de manifiesto la baja permeabilidad superficial del material y la alta compacidad del mismo.

La absorción de agua por capilaridad, mostrada en la figura 8, pone de manifiesto la baja porosidad de los hormigones diseñados, necesitando un mínimo de 50 horas para saturar las muestras ensayadas de la dosificación HACRF-8, mezcla con un coeficiente de absorción K de $7,282 \times 10^{-04} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$, y un mínimo de 175 horas para saturar las muestras ensayadas de la dosificación HACRF-4, mezcla con un coeficiente de absorción K de $9,529 \times 10^{-04} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$.

Destacar en este punto la mayor densidad y menor contenido de aire, determinados ambos parámetros sobre el hormigón fresco, de la dosificación HACRF-4 respecto de la HACRF-8, factores, que unidos al diferente volumen de pasta y esqueleto granular de ambas dosificaciones pueden influir de manera significativa en la microestructura de la red porosa.

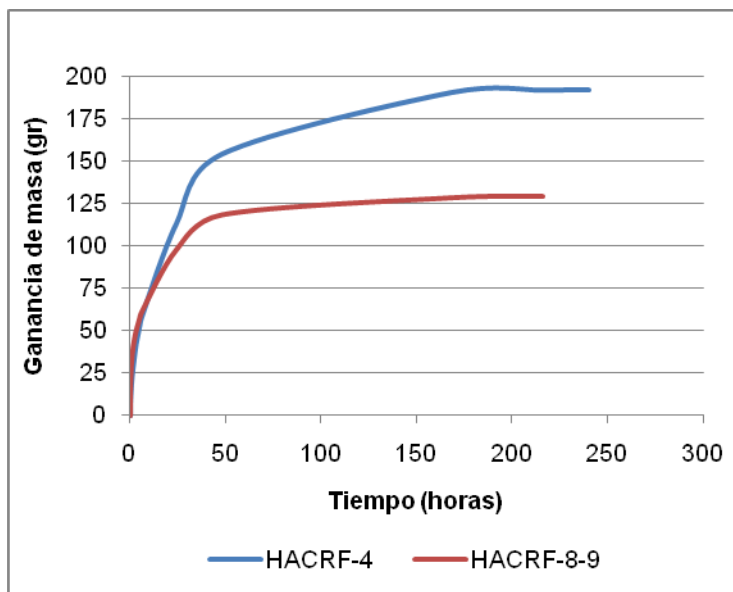


Figura 8. Absorción de agua por capilaridad.

Las figuras 9 y 10 recogen gráficamente la evolución de la retracción por secado de probetas sometidas a dos tipos de ambientes, uno seco (21°C, 50% H.R.) y otro seco (21°C, 50% H.R.) con curado previo durante siete días en ambiente húmedo (21°C, >95% H.R.).

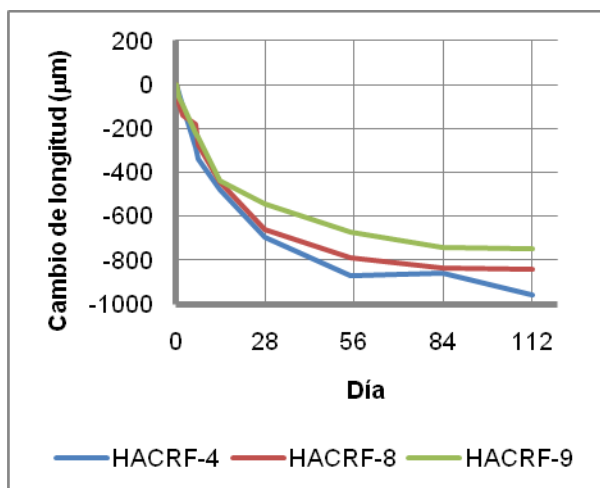


Figura 9. Retracción en ambiente seco.

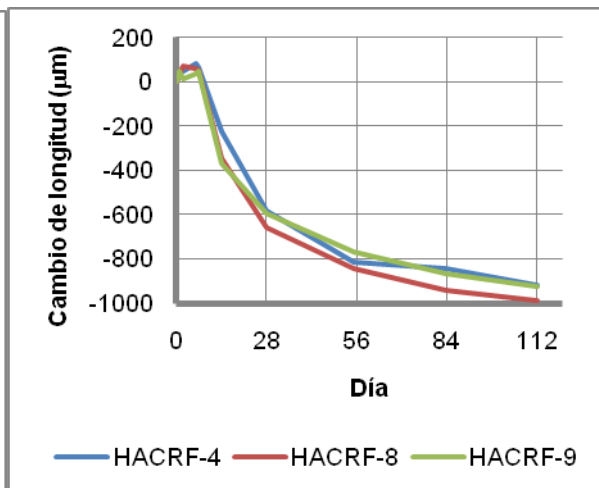


Figura 10. Retracción ambiente seco + húmedo.

Los resultados muestran que, las probetas curadas en ambiente seco experimentan una mayor retracción cuanto mayor es el contenido de cemento y menor la relación agua/cemento, como el caso de la dosificación HACRF-4 que presenta mayor retracción en ambiente seco. Otro aspecto a resaltar, en las probetas curadas en ambiente seco, es la menor retracción observada en la dosificación HACRF-9 respecto de la dosificación HACRF-8 lo que pone de manifiesto la influencia del tipo de fibra a igual dosificación de componentes. En ambiente seco, con curado previo en cámara húmeda durante 7 días, se observa como el aporte de agua ocurrido durante el curado húmedo contrarresta la retracción posterior, este aspecto se hace más evidente en la dosificación HACRF-4 la cual muestra la menor retracción en este ambiente.

4. Conclusiones

El diseño de mezclas debe cumplir las especificaciones de autocompactabilidad, de durabilidad y de propiedades mecánicas. El volumen de pasta regula el flujo de la masa de hormigón y por tanto la distribución y orientación de la fibra. En los ensayos realizados se ha determinado, que para incorporar un volumen de fibras que garantice el requisito de autocompactabilidad y un buen comportamiento mecánico post-fisuración, es necesario que el contenido de pasta se fije en torno a un 45%.

La durabilidad es un aspecto a tener en cuenta, por ello, es importante seleccionar adecuadamente los componentes y optimizar el esqueleto granular con el fin de garantizar una matriz densa y compacta. A partir de los resultados de las pruebas preliminares se seleccionaron dos diseños de mezclas para un mismo tipo de fibra (HACRF-4, HACRF-8). La primera (HACRF-4) se utilizó como referencia para la autocompactabilidad y las propiedades mecánicas. La segunda (HACRF-8) fue una dosificación optimizada, desde el punto de vista económico, reduciendo el contenido de cemento en 20 kg/m^3 y la proporción de fibra en 1 kg/m^3 . En las pruebas finales se observó que si las propiedades de autocompactabilidad no estaban bien controladas las propiedades mecánicas podían diferir de los resultados obtenidos en las pruebas preliminares. Esto se observó en la dosificación HACRF-8, que mostraba muy buenos resultados para las especificaciones de durabilidad pero que, sin embargo, presentó una disminución de los valores relacionados con las propiedades mecánicas respecto de las obtenidas en las pruebas preliminares. Este aspecto debe ser tenido en cuenta, a la hora de establecer unos criterios

apropiados de aceptación, cuando se modifique la escala de fabricación de laboratorio a central de hormigón.

Por último, como es el caso de la dosificación HACRF-4, mencionar que es posible diseñar un hormigón reforzado con fibras sintéticas que cumpla las exigencias del Anejo 14 de la EHE-08, para la consideración de la fibra como estructural.

Agradecimientos

Este trabajo se ha desarrollado dentro del proyecto Intramural 201060E118 “Investigación de hormigones especiales avanzados para aplicaciones estructurales en ingeniería y arquitectura” financiado por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, en colaboración con el proyecto del Plan Nacional BIA2007-62464 financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación.

Referencias

- [1] MINISTERIO DE FOMENTO. “EHE-08, Instrucción de Hormigón Estructural”. Real Decreto 1247/2008, 3ª edición, 2009. 720 p.
- [2] AENOR. “Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual). UNE EN 14651”. *Asociación Española de Normalización y Certificación*. Madrid.
- [3] AENOR. “Ensayos de hormigón fresco. Parte 8: Hormigón autocompactante. Ensayo del escurrimiento. UNE EN 12350-8”. *Asociación Española de Normalización y Certificación* Madrid.
- [4] AENOR. “Ensayos de hormigón fresco. Parte 9: Hormigón autocompactante. Ensayo del embudo en V. UNE EN 12350-9”. *Asociación Española de Normalización y Certificación*. Madrid.
- [5] AENOR. “Ensayos de hormigón fresco - Parte 12: Hormigón autocompactante. Ensayo con el anillo japonés. UNE EN 12350-12”. *España: Asociación Española de Normalización y Certificación*. Madrid.
- [6] BEZERRA E.M.; JOAQUIM A.P.; SAVASTANO Jr. H., JOHN V.M. y AGOPYAN V., “The effect of different mineral additions and synthetic fibre contents on properties of cement based composites”, *Cement Concrete Composite* 28 (6), 2006, pp 555–563.
- [7] FERNÁNDEZ-ALTABLE V. y CASANOVA I., “Influence of mixing sequence and superplasticiser dosage on the rheological response of cement pastes at different temperatures”, *Cement Concrete Reschear* 36 (7), 2006, pp 1222–1230.
- [8] AENOR. “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. UNE EN 12390-3”. *Asociación Española de Normalización y Certificación*. Madrid.
- [9] AENOR. “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas. UNE EN 12390-5”. *Asociación Española de Normalización y Certificación*. Madrid.
- [10] AENOR. “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión. UNE EN 12390-8”. *Asociación Española de Normalización y Certificación*. Madrid.
- [11] AENOR. “Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido. Método Fagerlund. UNE 83982”. *Asociación Española de Normalización y Certificación*. Madrid.
- [12] ASTM C 490/C 490M – 08. “Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete”. 2008.